

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平7-225200

(43) 公開日 平成7年(1995) 8月22日

(51) Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 N 22/00	Y			
	J			
G 0 1 R 27/26	H			

審査請求 未請求 請求項の数19 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願平6-305255

(22) 出願日 平成6年(1994)12月8日

(31) 優先権主張番号 P 4 3 4 2 5 0 5 . 4

(32) 優先日 1993年12月8日

(33) 優先権主張国 ドイツ (D E)

(71) 出願人 594200954

ヌーテック ゲーエムベーハー

NU-TECH GmbH

ドイツ連邦共和国 ノイミュンスター
24536, イルザール 5

(71) 出願人 594200965

ゲルト スタンゲ

Gerd Stange

ドイツ連邦共和国 ノルトルフ 24589,
クロンカンブ 39

(72) 発明者 ゲルト スタンゲ

ドイツ連邦共和国 ノルトルフ 24589,
クロンカンブ 39

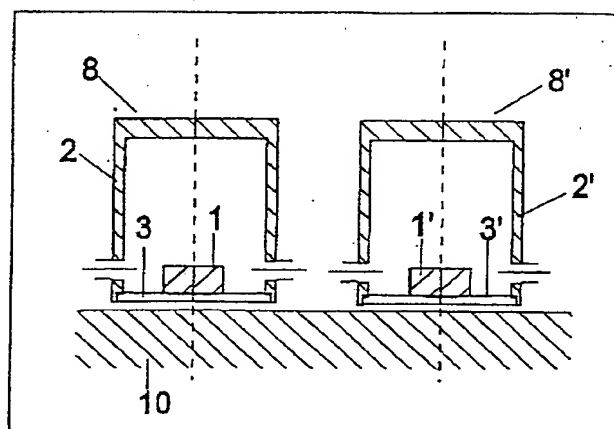
(74) 代理人 弁理士 山本 秀策

(54) 【発明の名称】 物質の複素誘電率の測定方法および装置

(57) 【要約】 (修正有)

【目的】 試料の存在に起因する離調量を評価することにより、試料の複素誘電率を測定する方法およびその装置を提供する。

【構成】 同一構造を有する2つのrf共振器8、8'を用い、各共振器8、8'は、第1の部分2、2'と、交流フィールドに対して透過性を有している第2の部分3、3'とを備えた筐体の中に誘電固体共振器1、1'とを有している。両rf共振器は、導体からなる各第1の部分2、2'が相互作用に対してシールドを行うように、かつ電磁フィールドに対して透過性を有している第2の部分3、3'が測定すべき物質に対向するような相対位置に設置される。rf共振器8、8'の共振周波数は、測定される物質の非存在下において、共通の動作周波数がrf共振器8、8'の共振周波数の中間に位置するように選択される。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】物質の存在に起因する r f 共振器の離調量を分析することによって、該物質の複素誘電率を決定するための装置であって、

該装置は、可変高周波数の電磁場を r f 共振器に送るための r f 送信手段と、共振器フィールドのための受信手段と、該受信手段に接続され、受け取った r f 信号の振幅を決定するための測定手段とを備えており、

該装置は、同一構造を有する 2 つの r f 共振器を有し、該 r f 共振器の各々は、第 1 の部分と第 2 の部分とを備えている筐体の中に誘電固体共振器を有し、該第 1 の部分は、導体材料によって該固体共振器を少なくとも 1 つの半球領域において囲んでおり、該第 2 の部分は、交流電磁フィールドに対して透過性を有しており、かつ該 r f 共振器の各々は該 r f 共振器の共振周波数を調整するための手段を有しており、

該 2 つの r f 共振器は、導体からなる該第 1 の部分の各々が該 r f 共振器を相互作用からシールドするように、かつ交流電磁フィールドに対して透過性を有している該第 2 の部分が該測定すべき物質に対向するような相対位置に位置するように調節され、

該装置は更に、該 r f 共振器の両方に同一周波数 (ω) を有する r f フィールドが供給されるように該 r f 送信手段および／または該 r f 共振器を制御するように、かつ該周波数 (ω) が、異なる値に前もって調整された該第 1 および第 2 の r f 共振器の共振周波数 (ω_{01} および ω_{02}) の中間に、該測定される物質が存在しない場合には位置するように調節される制御分析手段を備えており、該制御分析手段は該受け取った r f 信号の各々の振幅の測定値を受け取り、かつ該振幅の測定値の和および差値から該複素誘電率を決定するように調整される装置。

【請求項 2】前記筐体の前記第 2 の部分が、誘電体からなる請求項 1 に記載の装置。

【請求項 3】前記筐体の誘電体からなる前記第 2 の部分が、プラスチックまたはセラミック材料からなる請求項 1 に記載の装置。

【請求項 4】各 r f 共振器の前記筐体の前記第 1 の部分が、平らな基底領域の 1 つが完全にまたは部分的に開いた円柱状金属からなり、前記第 2 の部分が、該基底領域の該開口部中に位置する誘電体壁部からなる請求項 1 に記載の装置。

【請求項 5】前記筐体の前記第 2 の部分が、少なくとも部分的に開口しており、ガスおよび流体の測定を可能にしている請求項 1 に記載の装置。

【請求項 6】各 r f 共振器の前記筐体の前記第 1 の部分が、平らな基底領域の 1 つが完全にまたは部分的に開いた円柱状金属からなり、円柱状部分の直径が、該筐体のカットオフ波長の 2 分の 1 である請求項 1 に記載の装置。

【請求項 7】前記 r f 共振器の前記同調手段が、誘電体、磁性体、または金属からなる同調体を前記筐体の中に有し、該同調体の前記固体共振器に対する位置が、手動で変化可能であるか、または前記制御分析手段によって制御される請求項 1 に記載の装置。

【請求項 8】前記 r f 共振器の前記同調手段が、誘電体、磁性体、または金属からなる同調体を前記筐体の中に有し、該同調体の誘電体、磁気、または金属特性が前記制御分析手段からの制御信号によって変化可能である請求項 1 に記載の装置。

【請求項 9】前記 r f 共振器の両方が、前記測定される物質の上方に同じ高さで位置し、かつ互いに隣接し、その結果前記筐体の前記第 2 の部分が該測定される物質に対向している請求項 1 に記載の装置。

【請求項 10】前記誘電共振器の各々が、金属酸化物セラミック材料、好ましくは $\text{BaO}-\text{PbO}-\text{Nd}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$ 、金属チタネート、特に $\text{Sn}-\text{チタネート}$ または $\text{Zr}-\text{チタネート}$ 、 Ba の他に更に金属 Zr 、 Sn または Ta を含有する混合酸化物、または $\text{MgTiO}_3-\text{CaTiO}_3$ からなる請求項 1 に記載の装置。

【請求項 11】前記 2 つの共振器の他に、前記 r f 送信手段および前記制御分析手段に該 2 つの共振器と同様に結合され、互いに同一構造を有する第 2 の r f 共振器対を備えており、該第 2 の r f 共振器対は、該 2 つの r f 共振器に独立して、基準媒体に対向可能である請求項 1 に記載の装置。

【請求項 12】物質の存在に起因する r f 共振器の離調量を分析することによって、該物質の複素誘電率を測定するための方法であって、

任意の選択された周波数の高周波の電磁場が r f 共振器に結合され、共振器フィールドが受信手段によって検知され、受け取られた r f 信号の振幅が測定手段によって決定され、

2 つの r f 共振器を用い、該 r f 共振器の各々は、第 1 の部分と第 2 の部分とを備えている筐体の中に誘電固体共振器を有し、該第 1 の部分は、導体材料によって該固体共振器を少なくとも 1 つの半球領域において囲んでおり、該第 2 の部分は、交流電磁フィールドに対して透過性を有しており、該 2 つの r f 共振器は、該第 2 の部分の各々が該物質に対向するように、かつ該第 1 の部分の各々が該第 2 の部分から由来する電磁フィールドに起因する相互作用からシールドするように該測定される物質に対して方向付けられ、

同調手段を用いて、該測定される物質が存在しない場合には第 1 および第 2 の r f 共振器がそれぞれ異なる第 1 の共振周波数 (ω_{01}) および第 2 の共振周波数 (ω_{02}) を有するように該第 1 および第 2 の r f 共振器を同調し、該第 2 の周波数は該第 1 の周波数と異なり、かつ第 1 の共振周波数 (ω_{01}) および第 2 の共振周波数

(ω_{02}) の中間に位置する周波数 (ω) を有する電磁フ

3

ィールドを、該 r f 共振器の両方に供給し、

該 2 つの r f 共振器中の該受け取った r f 信号の振幅の測定値を制御分析手段に供給し、かつ該制御分析手段において、該測定される物質の該誘電率を、該測定された振幅値の和および差値に基づいて所定の関係を用いて決定することを特徴とする方法。

【請求項 13】以下の式の所定の関係を用いることを特徴とする請求項 12 に記載の方法：

【数 1】

$$\Delta e' \propto \frac{F1-F2}{F1_0+F2_0}$$

【数 2】

$$\Delta e'' \propto \frac{F1_0+F2_0-(F1+F2)}{F1_0+F2_0}$$

ここで、F1 および F2 は、前記第 1 および第 2 の r f 共振器が前記測定されるべき物質に向けられたときの該第 1 および第 2 の r f 共振器の各々の前記受け取った r f 信号の前記振幅値であり、F1₀ および F2₀ は、該測定すべき物質が存在しない場合に対応する振幅である。

【請求項 14】前記所定の関係として、予め実証的に決定された較正曲線を用いることを特徴とする請求項 12 に記載の方法。

【請求項 15】前記 2 つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数 (ω) を供給され、検知された r f 信号が前記制御分析手段によって前記 2 つの r f 共振器と同様に分析される第 2 の r f 共振器対を用い、該第 2 の共振器対を基準媒体に向け、該第 2 の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項 12 に記載の方法。

【請求項 16】前記 2 つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数 (ω) を供給され、検知された r f 信号が前記制御分析手段によって前記 2 つの r f 共振器と同様に分析される第 2 の r f 共振器対を用い、該第 2 の r f 共振器対を空の空間に向け、該第 2 の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項 12 に記載の方法。

【請求項 17】前記 2 つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数 (ω) を供給され、検知された r f 信号が前記制御分析手段によって前記 2 つの r f 共振器と同様に分析される第 2 の r f 共振器対を用い、該第 2 の r f 共振器対を前記測定すべき媒体の乾燥試料に向け、該第 2 の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項 12 に記載の方法。

【請求項 18】前記 2 つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数 (ω) を供給され、検知された r f 信号が前記制御分析手段によって前記 2 つの r f 共振器と同様に分析される第 2 の r f 共振器対を用い、該第 2 の r f 共振器対を前記測定すべき媒体の既知の湿度を有する試料に向け、該第 2 の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項 12 に記載の方法。

4

【請求項 19】前記 2 つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数 (ω) を供給され、検知された r f 信号が前記制御分析手段によって前記 2 つの r f 共振器と同様に分析される第 2 の r f 共振器対を用い、該第 2 の r f 共振器対を前記測定すべき物質の既知の厚さを有する誘電体層に向け、該第 2 の共振器対の値を基準量として用いることを特徴とする請求項 15 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

10 【産業上の利用分野】本発明は、試料の存在に起因する r f 共振器離調量の分析によって、試料の複素誘電率を決定する方法およびその装置に関する。本発明の装置は、選択された周波数の r f 電磁場を r f 共振器中に送るための r f 送信機システムと、共振器フィールドのための r f 受信システムと、前記 r f 受信システムに接続され、受け取った r f 信号の振幅を決定する測定ユニットとを備えている。

【0002】

20 【従来の技術】誘電体の特性を決定するための方法が幾つか知られている。それらの方法において、誘電特性は典型的には、相対誘電率 ε_r とロス角 tan (δ) とを用いて、または複素誘電率 ε = ε' - i ε'' として記述される。これらの方法は、例えば、材料の湿度を決定するために用いられる。このような方法は、試料に含有される水分の持つ大きな誘電率および大きなロス角を利用するものであり、産業利用において、化学物質、食品、タバコ、コーヒーなどの湿度測定など重要な役割を果たしている。マイクロ波共振法を湿度測定に応用する場合、測定する試料を空洞共振器内に置き、試料の存在に起因する離調量を、r f 周波数の変化および共振曲線のサンプリングによって測定する。共振器の共振周波数の同調のシフトおよび、共振帯幅の増加または特性係数から、試料の誘電率を、その物質の既知の組成および密度について、推定し得る。通常、これは、前もって各試料を異なる湿度含有量において測定することによって得られる較正曲線を必要とする。公知の方法の大部分は、密度の較正測定を更に必要とする。

30 【0003】DE-OS 40 04 119 に、空洞共振器を用いて湿度を決定する方法が開示されている。この方法によれば、試験する試料内のフィールド構成を適宜選択することにより、湿度および密度を独立に決定する。共振周波数および共振帯幅は、完全な共振曲線をサンプリングすることにより決定分析される。この場合、試料を空洞共振器内に置くことがやはり必要である。

50 【0004】E. Wehrsdorfer らによる論文「マイクロ波帯域での光学結晶測定のための誘電率測定場所」Kristall und Technik ("結晶と技術")、Bd. 10、Nr. 6 1975、p. 695-700 に、上記と同様な方法が開示されている。この方法によれば、マイクロ波帯域の周波数中に

において作動される空洞共振器に負荷をかけることによって、試料の誘電率を決定する。試料の存在に起因する共振周波数および特性係数の変化を、試料に照射した後の共振曲線を測定することによって決定する。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】産業利用のほとんどにおいて、公知の共振による物質の誘電特性決定法は、測定する試料を、厳密に規定された条件下で共振器内に置かなければならないという欠点を有する。連続的な製造生産過程において、これら公知の方法においては、ランダムサンプル測定を用いて、比較的多大な手間をかけて空洞共振器内で測定出来るのみである。このようなランダムサンプル測定では、調べたい測定量に対し、必ず時間の遅れが出る。更に、物質特性が、測定されるべき物質の流れに比較して、試料が採取された時点とその後の測定との間に変化しないという保証はない。連続的な製造生産過程において、誘電測定量の瞬間値およびそこから推定された湿度などの瞬間値に、連続的にアクセス出来ることが好ましい。しかし、これは、空洞共振器を用いる方法では基本的に不可能である。

【0006】DD-PS 138 468に、片面を金属化した誘電体板の複素誘電率の測定方法が開示されている。測定は、 E_{011} モードで励起した誘電共振器を、上記板の金属化されていない方の面に設置して行う。金属化された方の面は、共振系の終端として機能する。共振器を直接金属板上に置いた場合の共振周波数の変化から、この板状材料の誘電率を、既知の厚さについて決定し得る。この方法の欠点は、片面を金属化した板のみ測定可能である点である。更に、共振周波数を決定するためには、測定毎に完全な共振曲線をサンプリングしなければならない。

【0007】共振器フィールドと共振器の外側に位置する物質との間の相互作用を妨げないような「開いた」空洞共振器を用いた実験、例えばスロット状の開口部を有するチャンバ等、でも、満足な結果は得られなかった。何故なら、これらの実験では比較的感受度が低く、また、照射されるマイクロ波の量が比較的高レベルであるためである。

【0008】更に、如何なる公知のセンサデバイスも、共振器内に照射される異なる周波数で多数の測定ポイントを用いることによってこれらの測定ポイントから共振曲線を決定し、そこから共振器周波数および帯域幅を最終的に決定しなければならないという欠点を有するため、望ましくない。この方法は、異なる周波数において多数の測定量を取得し、格納後に分析しなければならないため、回路において相当な手間を要する。

【0009】本発明の1つの目的は、物質の存在に起因するrf共振器離調量の分析によって前記物質の誘電特性を決定する方法および装置であって、調べたい誘電特性を連続的かつ遅延なく決定することを可能にする方法

および装置を提供することである。

【0010】本発明の他の目的は、簡単な分析回路を用いて物質の誘電特性を決定する方法および装置を提供することである。

【0011】本発明の他の目的は、材料の湿度および密度または材料層の厚さを決定するために、物質の誘電特性を決定する方法および装置を提供することである。

【0012】

【課題を解決するための手段】本発明によれば、物質の存在に起因するrf共振器の離調量を分析することによって、前記物質の複素誘電率を決定するための装置であって、前記装置は、可変高周波数の電磁場をrf共振器に送るためのrf送信手段と、共振器フィールドのための受信手段と、前記受信手段に接続され、受け取ったrf信号の振幅を決定するための測定手段とを備えており、前記装置は、同一構造を有する2つのrf共振器を有し、前記rf共振器の各々は、第1の部分と第2の部分とを備えている筐体の中に誘電固体共振器を有し、前記第1の部分は、導体材料によって前記固体共振器を少なくとも1つの半球領域において囲んでおり、前記第2の部分は、交流電磁フィールドに対して透過性を有しており、かつ前記rf共振器の各々は前記rf共振器の共振周波数を調整するための手段を有しており、前記2つのrf共振器は、導体からなる前記第1の部分の各々が前記rf共振器を相互作用からシールドするように、かつ交流電磁フィールドに対して透過性を有している前記第2の部分が前記測定すべき物質に対向するような相対位置に位置するように調節され、前記装置は更に、前記rf共振器の両方に同一周波数(ω)を有するrfフィールドが供給されるように前記rf送信手段および/または前記rf共振器を制御するように、かつ前記周波数(ω)が、異なる値に前もって調整された前記第1および第2のrf共振器の共振周波数(ω_{01} および ω_{02})の中間に、前記測定される物質が存在しない場合には位置するように調節される制御分析手段を備えており、前記制御分析手段は前記受け取ったrf信号の各々の振幅の測定値を受け取り、かつ前記振幅の測定値の和および差値から前記複素誘電率を決定するように調整され、そのことにより、上記目的が達成される。

【0013】好ましくは、前記筐体の前記第2の部分が、誘電体からなっているいてもよい。好ましくは、前記筐体の誘電体からなる前記第2の部分が、プラスチックまたはセラミック材料からなっているいてもよい。

【0014】好ましくは、各rf共振器の前記筐体の前記第1の部分が、平らな基底領域の1つが完全にまたは部分的に開いた円柱状金属からなり、前記第2の部分が、前記基底領域の前記開口部中に位置する誘電体壁部からなっているいてもよい。

【0015】好ましくは、前記筐体の前記第2の部分が、少なくとも部分的に開口しており、ガスおよび流体

の測定を可能にしているもよい。

【0016】好ましくは、各rf共振器の前記筐体の前記第1の部分が、平らな基底領域の1つが完全にまたは部分的に開いた円柱状金属からなり、円柱状部分の直径が、前記筐体のカットオフ波長の2分の1であってもよい。

【0017】好ましくは、前記rf共振器の前記同調手段が、誘電体、磁性体、または金属からなる同調体を前記筐体の中に有し、前記同調体の前記固体共振器に対する位置が、手動で変化可能であるか、または前記制御分析手段によって制御されてもよい。

【0018】好ましくは、前記rf共振器の前記同調手段が、誘電体、磁性体、または金属からなる同調体を前記筐体の中に有し、前記同調体の誘電体、磁気、または金属特性が前記制御分析手段からの制御信号によって変化可能であってもよい。

【0019】好ましくは、前記rf共振器の両方が、前記測定される物質の上方に同じ高さで位置し、かつ互いに隣接し、その結果前記筐体の前記第2の部分が前記測定される物質に対向しているもよい。

【0020】好ましくは、前記誘電共振器の各々が、金属酸化物セラミック材料、好ましくはBaO-PbO-Nd₂O₃-TiO₂、金属チタネート、特にSn-チタネートまたはZr-チタネート、Baの他に更に金属Zr、SnまたはTaを含有する混合酸化物、またはMgTiO₃-CaTiO₃からなっているもよい。

【0021】好ましくは、前記2つの共振器の他に、前記rf送信手段および前記制御分析手段に前記2つの共振器と同様に結合され、互いに同一構造を有する第2のrf共振器対を備えており、前記第2のrf共振器対は、前記2つのrf共振器に独立して、基準媒体に対向可能であってもよい。

【0022】本発明による方法は、物質の存在に起因するrf共振器の離調量を分析することによって、前記物質の複素誘電率を測定するための方法であって、任意の選択された周波数の高周波の電磁場がrf共振器に結合され、共振器フィールドが受信手段によって検知され、受け取られたrf信号の振幅が測定手段によって決定され、2つのrf共振器を用い、前記rf共振器の各々は、第1の部分と第2の部分とを備えている筐体の中に誘電固体共振器を有し、前記第1の部分は、導体材料によって前記固体共振器を少なくとも1つの半球領域において囲んでおり、前記第2の部分は、交流電磁フィールドに対して透過性を有しており、前記2つのrf共振器は、前記第2の部分の各々が前記物質に対向するように、かつ前記第1の部分の各々が前記第2の部分から由来する電磁フィールドに起因する相互作用からシールドするように前記測定される物質に対して方向付けられ、同調手段を用いて、前記測定される物質が存在しない場合には第1および第2のrf共振器がそれぞれ異なる第

1の共振周波数(ω_{01})および第2の共振周波数

(ω_{02})を有するように前記第1および第2のrf共振器を同調し、前記第2の周波数は前記第1の周波数と異なり、かつ第1の共振周波数(ω_{01})および第2の共振周波数(ω_{02})の中間に位置する周波数(ω)を有する電磁フィールドを、前記rf共振器の両方に供給し、前記2つのrf共振器中の前記受け取ったrf信号の振幅の測定値を制御分析手段に供給し、かつ前記制御分析手段において、前記測定される物質の前記誘電率を、前記測定された振幅値の和および差値に基づいて所定の関係を用いて決定し、そのことにより、上記目的が達成される。

【0023】好ましくは、以下の式の所定の関係を用いてもよい。

【0024】

【数3】

$$\Delta e' \propto \frac{F1-F2}{F1_0+F2_0}$$

【0025】

【数4】

$$\Delta e'' \propto \frac{F1_0+F2_0-(F1+F2)}{F1_0+F2_0}$$

【0026】ここで、F1およびF2は、前記第1および第2のrf共振器が前記測定されるべき物質に向けられたときの前記第1および第2のrf共振器の各々の前記受け取ったrf信号の前記振幅値であり、F1₀およびF2₀は、前記測定すべき物質が存在しない場合に対応する振幅である。

【0027】好ましくは、前記所定の関係として、予め実証的に決定された較正曲線を用いてもよい。

【0028】好ましくは、前記2つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数(ω)を供給され、検知されたrf信号が前記制御分析手段によって前記2つのrf共振器と同様に分析される第2のrf共振器対を用い、前記第2の共振器対を基準媒体に向け、前記第2の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【0029】好ましくは、前記2つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数(ω)を供給され、検知されたrf信号が前記制御分析手段によって前記2つのrf共振器と同様に分析される第2のrf共振器対を用い、前記第2のrf共振器対を空の空間に向け、前記第2の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【0030】好ましくは、前記2つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数(ω)を供給され、検知されたrf信号が前記制御分析手段によって前記2つのrf共振器と同様に分析される第2のrf共振器対を用い、前記第2のrf共振器対を前記測定すべき媒体の乾燥試料に向け、前記第2の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【0031】好ましくは、前記2つの共振器と同一の構

造を有し、同じ前記動作周波数 (ω) を供給され、検知された r f 信号が前記制御分析手段によって前記 2 つの r f 共振器と同様に分析される第 2 の r f 共振器対を用い、前記第 2 の r f 共振器対を前記測定すべき媒体の既知の湿度を有する試料に向け、前記第 2 の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【0032】好ましくは、前記 2 つの共振器と同一の構造を有し、同じ前記動作周波数 (ω) を供給され、検知された r f 信号が前記制御分析手段によって前記 2 つの r f 共振器と同様に分析される第 2 の r f 共振器対を用い、前記第 2 の r f 共振器対を前記測定すべき物質の既知の厚さを有する誘電体層に向け、前記第 2 の共振器対の値を基準量として用いてもよい。

【0033】

【作用】本発明によれば、同一構造を有する 2 つの r f 共振器が、測定すべき試料の誘電特性の測定のために用いられる。この 2 つの r f 共振器は、誘電固体 r f 共振器を備えている。固体共振器は、誘電物質の特性の r f 測定デバイスのアプリケーションのための要件を満たす特性を有することが確認されている。すなわち、電磁場が、誘電体共振器の内部に閉じこめられず、消失しないフィールドが共振器ボディの外部に存続する。外部フィールドは、急速に減衰するため、電磁場エネルギーの放射に起因して問題が起こることはない。一方で、共振器外部の消失しないフィールドのために、共振器近傍に存在する物質に対し、十分な感度を得られる。測定された信号は、固体共振器近傍に設けられた受信手段中に誘導されたものであり、これら信号は、波高値整流などの公知の測定回路によって復調され得る。

【0034】上記各固体共振器は、筐体中に位置している。筐体は、少なくとも 1 つの半球領域を囲む第 1 部分では導体からなり、第 2 の部分においては電磁場に対して透過性を有する物質からなる。両 r f 共振器は、導体からなる各筐体部分が前記固体共振器を相互作用からシールドし、かつ、透過性を有する部分が測定される物質に向けられるような相対位置を有する。これら導体筐体部分を用いて固体共振器を互いにシールドすることが好ましい理由は、両 r f 共振器が、互いに近く位置させられることによって、測定される物質の同一領域または近接する領域に向けられるためである。

【0035】同一の r f フィールドが、両 r f 共振器中に結合される。すなわち、両共振器は、同じ周波数で作動される。この周波数は、測定すべき物質の非存在下において、第 1 の共振器の共振器周波数と、第 1 の共振器の共振器周波数とは異なる予め調整された第 2 の共振器の共振器周波数との、丁度中間に位置するように選択される。測定すべき物質の存在に起因する離調により、両共振曲線がシフトし、一定の定動作周波数における対応する共振曲線上の動作点がシフトし、同時に、両共振器の帯域幅が拡張され (特性係数の変化)、この両効果に

より、共振フィールドの測定振幅値が影響される。測定すべき物質の存在下において、両共振器で測定されたフィールドの和および差をとることにより、この物質の誘電特性を完全に決定することが可能である。この評価は、測定された振幅値を受け取り、その和値および差値を計算し、その関係を示す分析式を複素誘電率または実証的に得られた較正曲線に対して用いる制御分析手段中で行われる。

【0036】

10 【実施例】図 1 は、本発明の装置のための r f 共振器を単体で示している。この r f 共振器は、銅からなる第 1 の部分 (筐体) 2 および第 2 の部分 (筐体) 3 を有する円柱状のハウジングを備えている。第 2 部分は、円柱表面の平面の 1 つを規定し、電磁波に対し透過性を有する。第 2 部分は、例えばセラミックまたはプラスチック材料からなる。筐体 2 および 3 の内部には、円盤状の誘電共振器 1 を有する。本実施例では、誘電共振器 1 は、基底面 (筐体) 3 に直接取り付けられているが、任意の手段を用いることにより、ハウジング内部の他の部分に配置されてもよい。電磁 r f フィールドを誘電共振器 1 内に結合するため、および共振器フィールドの検知のために、同軸ケーブル 4 a および 4 b がそれぞれ筐体 2 の対向する面に設けられており、同軸ケーブル 4 a および 4 b の誘電共振器側の一端は、結合ループ 5 a および 5 b で終わっている。結合ループ 5 a および 5 b は、中心の導体と同軸ケーブルシールド 4 a および 4 b との間にそれぞれ単純な導体ループを形成している。これらの導体ループ (結合ループ) 5 a および 5 b は、それぞれ送信手段および受信手段として機能する。

20 【0037】回転対称固体共振器、特に半径 a および高さ h の円盤状共振器のレイアウトに関して、以下の考察がなされる。共振器内部の磁場の z 成分について、

【0038】

【数 5】

$$H_z \propto J_0(k_a r)$$

【0039】の式を仮定し、共振器外部の磁場の z 成分において、

【0040】

【数 6】

$$H_z \propto K_0(hr)$$

【0041】を仮定する。ただし、 k_a および ih は、(それぞれ) 共振器内部および外部でのカットオフ波番号であり、 J_0 および K_0 は、(それぞれ) 実数および虚数論における 0 次ベッセル関数である。カットオフ波数は、共振波数 β および真空における波数 k に対し、以下の関係を有する：

【0042】

【数 7】

$$\beta_c^2 = k^2 - \beta^2$$

50 【0043】r 方向および z 方向において、以下の境界

条件が実質的に満たされなければならない:

【0044】

【数8】

$$\beta_d^2 = \left(\frac{P_{01}}{a} \right)^2, \quad \beta^2 = \left(\frac{\pi}{L} \right)^2$$

【0045】ただし、 P_{01} は、 J_0 の第1根 (the first root) である。更に、

【0046】

【数9】

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} = \omega^2 \mu_z \mu_0 \epsilon_z \epsilon_0 = \kappa k_0^2, \quad \kappa = \epsilon_z \mu_z$$

【0047】である。

【0048】 $L = a$ 、周波数 2.5 GHz、共振器の $\epsilon_z = 38$ 、および $P_{01} = 2.405$ であると仮定すると、

【0049】

【数10】

$$k^2 = \frac{\pi^2}{a^2} + \frac{P_{01}^2}{a^2} = \frac{(2\pi f)^2}{c^2} \epsilon_z$$

【0050】から、 $a = L = 12.25 \text{ mm}$ である共振器レイアウトが得られる。

【0051】更に、rf 共振器中に、共振器周波数を調整するための同調手段 (不図示) が設けられる。前記同調手段は、例えば、誘電共振器に対し位置調整可能な同調体からなる。最も単純には、同調手段は、金属筐体 2 および 3 内に所望の深さまで回し入れることによって、誘電共振器から所望の距離に達せられるような金属ネジである。また、一般に、誘電体または磁気同調体を用いることも可能である。そのような同調体の位置は、手動または、制御分析ユニットからの外部信号によって制御される駆動機構によって調整可能である。または、位置固定された同調体を用いてもよく、その場合、同調体の誘電特性、磁気特性、または金属特性は電気制御信号によって変化させることができ、その結果、rf 共振器の共振周波数の調整が可能になる。

【0052】誘電共振器 1 への入出力のための結合ループ 5 a および 5 b は、対称的な構成を有し、任意に送信器または受信器として選択され得るように構成される。ループ 5 b を受信ループと考えた場合、ループ 5 b 中に固体共振器 1 のフィールドによって誘導された信号は、測定回路に与えられる。測定回路は、例えば波高値整流などにより、共振器フィールドの振幅に比例した信号を生成する。この信号は、アナログ/デジタル変換後、続いて制御分析ユニットによって更に分析される。制御分析ユニットは、典型的にはマイクロプロセッサを有する。

【0053】以下に、図 6 に示す 2 つの対称な共振器からなる共振器群の近傍に置かれた物質の誘電特性と、本発明における共振器群からの信号の和および差との特徴的な関係を、単体の rf 共振器の等価回路を用いて説明

する。図 3 に、その等価回路を RLC 回路として示す。2 つのループによる rf フィールド結合は、トランス回路として示され得る。入出力結合ループは、固体共振器の対角線上の対向する位置に設けられているため、並列トランスと見なし得る。この 2 つを、相互インダクタンス M で結合すると、図 3 の等価回路が得られる。ここで、回路中に示されるインピーダンス群は、以下の定義を有する。

【0054】

10 R_G rf 発生器の電源抵抗 (定電流源)

L_0 結合ループインダクタンス

L 共振器インダクタンス

M 相互結合インダクタンス

C 共振容量

R_i 共振内部抵抗

R_{out} 出力抵抗

結合ループ 5 a は、誘電共振器 1 の漂遊フィールド内部に完全に含まれるため、巻き数を 1 とすると、

【0055】

20 【数11】

$$M = L_0$$

【0056】と仮定できる。

【0057】更に、

【0058】

【数12】

$$R_{out} \gg \omega M$$

【0059】

【数13】

$$R_G \gg \omega M$$

30 【0060】と仮定できる。

【0061】これらの仮定に基づき、図 3 の等価回路は単純化され、図 4 に示す等価回路となる。

【0062】次のステップにおいて、図 4 右側の並列インピーダンスは、

【0063】

【数14】

$$\omega C R_i = Q_i \gg 1$$

【0064】という仮定の下において、以下の等価直列インピーダンスに変換される。

40 【0065】

【数15】

$$Z_s = \frac{1}{\omega^2 C^2 R_i} - j \frac{1}{\omega C}$$

【0066】上記の結果、図 5 に示す等価回路が得られる。この回路の入力インピーダンスは、

【0067】

【数16】

$$Z_{in} = j\omega M + \frac{\omega^2 M \left[\frac{1}{\omega^2 C^2 R_i} - j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right]}{\left(\frac{1}{\omega^2 C^2 R_i} \right)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

【0068】となる。

【0069】共振近傍においては、上記式の第1項は、上記式の第2項に比べて無視できる。以下に示すように入力インピーダンス絶対値を導くことができる。

【0070】

【数17】

$$|Z_{in}| = \frac{\omega^2 M^2 C^2 R_i}{\sqrt{1 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 (\omega^2 C^2 R_i)^2}}$$

【0071】ここで、

【0072】

【数18】

$$\omega^2 C^2 R_i = \frac{\frac{\omega C}{G_i}}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{Q_i}{\frac{1}{\omega C}} > 1$$

【0073】を用いている。

【0074】これは、一方では、無負荷の誘電共振器の有する高 Q_i 値に起因する。また一方では、共振周波数近傍において、 $1/C$ 値は L の値に近い。後者の量 L は、以下の理由により容易に決定し得る。すなわち、半径 a および高さ h を有する円盤状誘電共振器のインダクタンスは、実質的に、

【0075】

【数19】

$$L = \mu_0 a \left(\ln \frac{a}{h} + \frac{3}{2} \right)$$

【0076】と与えられるからである。上記式に、典型値 $a = 6 \text{ mm}$ 、 $h = 4 \text{ mm}$ 、および周波数 2.5 GHz を代入すると、

【0077】

【数20】

$$\omega L = 225 \Omega$$

【0078】を得る。

【0079】上記表現を入力インピーダンス $|Z_{in}|$ につき、共振周波数 ω_0 の周りでテイラー級数展開することにより、

【0080】

【数21】

$$|Z_{in}| = \omega^2 M^2 C^2 R_i \left[1 - 2Q_i^2 \left(\frac{\Delta \omega}{\omega_0} \right)^2 \right]$$

【0081】が得られる。ここで、

【0082】

【数22】

$$Q_i = \omega_0 C R_i$$

【0083】を用いている。

【0084】更に、以下に定義する結合係数 k が導入さ

れる：

【0085】

【数23】

$$k = \frac{M}{L} = \frac{L_0}{L}$$

【0086】式中、上記式では M を L_0 で近似している。ループ半径 b およびコンダクタ半径 r を有する結合ループのインダクタンス L_0 は、

【0087】

10 【数24】

$$L_0 = \mu_0 b \left(\ln \frac{b}{r} + \frac{1}{4} \right)$$

【0088】で与えられる。

【0089】周波数 2.5 GHz 、 $b = 1.5 \text{ mm}$ 、および $r = 0.5 \text{ mm}$ において、 $L_0 = 39$ が得られる。

このとき、結合係数 k は、 0.177 と定義する。

【0090】 k の上記定義を、 $|Z_{in}|$ の式に挿入すると、

【0091】

20 【数25】

$$|Z_{in}| = k^2 \frac{\omega_0^4}{\omega^4} R_i \left[1 - 2Q_i^2 \left(\frac{\Delta \omega}{\omega_0} \right)^2 \right]$$

【0092】が得られる。

【0093】最後に、出力抵抗 R_{out} が、後に考慮される。 R_i は、

【0094】

【数26】

$$R_i = Q_i \frac{1}{\omega_0 C} = 2000 \cdot 225 \Omega = 450 \text{ k}\Omega$$

30 【0095】で与えられる高い値を有するため、上記 $|Z_{in}|$ の式中、カッコ (\quad) の前の係数全体は、これが十分小さいと仮定された場合、出力抵抗に等しくなる。これにより、最終的に、

【0096】

【数27】

$$|Z_{in}| = R_{out} \left[1 - 2Q_i^2 \left(\frac{\Delta \omega}{\omega_0} \right)^2 \right]$$

【0097】が得られる。

40 【0098】上記の関係から、固体共振器の近傍に置かれた測定すべき試料による影響が推定され得る。共振周波数 ω_0 近傍における $|Z_{in}|$ の ε' の小さい変化の影響、すなわち $\Delta \omega = \omega - \omega_0 \ll \omega'$ は、共振器の近傍に置かれた測定すべき試料に起因するため、以下のように示される。

【0099】

【数28】

$$\begin{aligned} \frac{d|Z_{in}|}{d\varepsilon'} &= \frac{d|Z_{in}|}{d\omega_0} \frac{d\omega_0}{d\varepsilon'} = -2R_{out}Q_i^2 \frac{d}{d\omega_0} \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2 \frac{d\omega_0}{d\varepsilon'} \\ &= 4R_{out}Q_i^2 \frac{\omega(\omega - \omega_0)}{\omega_0^3} \frac{d\omega_0}{d\varepsilon'} \end{aligned}$$

【0100】ここで、以下の関係

【0101】

【数29】

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC_0 \epsilon'}}$$

【0102】

【数30】

$$\frac{d\omega_0}{d\epsilon'} = -\frac{1}{2} \omega_0 \frac{1}{\epsilon'}$$

【0103】を考慮すると、最終的に、

【0104】

【数31】

$$\Delta|Z_{in}| = -2R_{out} Q_i^2 \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \frac{1}{\epsilon'} \Delta\epsilon' = \Delta\epsilon'$$

【0105】が得られる。

【0106】ここで、 ϵ' が増加する場合の $|Z_{in}|$ の変化の符号は、共振周波数 ω_0 が動作周波数 ω より高いか低いかによって依存することに注意する。すなわち、動作周波数 ω の上下対称に動作する2つの共振器の場合、共振器信号の差 $F1 - F2$ は、 $\Delta\epsilon'$ に比例する。

【0107】ここで、誘電率の虚数部の変化に起因する影響を考慮する。虚数部 ϵ'' は既に上記式、

【0108】

【数32】

$$|Z_{in}| = R_{out} [1 - 2Q_i^2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2]$$

【0109】中に、 Q_i に以下のように隠れて含まれている。

【0110】

【数33】

$$Q_i = \frac{1}{\tan(\delta)} = \frac{\epsilon'}{\epsilon''}$$

【0111】これより、

【0112】

【数34】

$$|Z_{in}| = R_{out} [1 - 2 \frac{\epsilon'^2}{\epsilon''^2} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2]$$

【0113】となる。これより、 ϵ'' にともなう $|Z_{in}|$ の変化は、

【0114】

【数35】

$$\Delta|Z_{in}| = \frac{d|Z_{in}|}{d\epsilon''} \Delta\epsilon'' = -4R_{out} \frac{\epsilon'^2}{\epsilon''^3} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)^2 \Delta\epsilon'' = \Delta\epsilon''$$

【0115】となる。

【0116】ここで、上記 $|Z_{in}|$ の ϵ' 依存性とは対照的に、 ϵ'' が変化した場合の $|Z_{in}|$ 符号は、共振器が共振周波数 ω_0 の上で動作するか下で動作するかによって依存しないことに注意しなければならない。その結果、動作周波数 ω の上下対称に同調された2つの共振器の場合、共振器信号の和は $\Delta\epsilon''$ に比例すると推定される。

上記から明らかなように、符号の反転によって ϵ' の変化の効果は前記和の中で互いを相殺し、和は ϵ'' の変化のみに依存するようになる。

【0117】 $\Delta\epsilon'$ に上記のように比例する前記差は、 ϵ'' の変化に影響されない。何故なら、 ϵ'' の変化は、第1および第2の共振器において同符号で起こり、その結果差をとることにより互いを相殺するからである。

【0118】要約すれば、対称な1対の共振器により、測定信号 $F1$ および $F2$ の和および差は、互いに"直交(orthogonal)"し、 ϵ' と ϵ'' とに起因する効果は結びつかない。これらのおよび差は、

【0119】

【数36】

$$\Delta\epsilon' \propto \frac{F1 - F2}{F1_0 + F2_0}$$

【0120】

【数37】

$$\Delta\epsilon'' \propto \frac{F1_0 + F2_0 - (F1 + F2)}{F1_0 + F2_0}$$

【0121】によって正規化されてもよい。式中、 $F1$ および $F2$ は、第1および第2の共振器からの無負荷時、すなわち測定すべき物質が存在しない場合の、共振器信号である。

【0122】図6は、2つの隣接するrf共振器8および8'を示している。図中、フィールド透過性部分(筐体)3および3'は、測定すべき試料10に面しており、導体である筐体部分2および2'は、共振器フィールドの相互作用を防ぐシールド機能を有する。金属筐体部分2および2'により、共振器1および1'の上方の半球領域がシールドされる。更に、指向性を実現されるので、誘電共振器1および1'からの共振器フィールドは、測定すべき試料10に方向付けられる。

【0123】rf共振器8および8'には、結合ループ(図1中4a)を介して、周波数 ω である同一rfフィールドを供給される。各rf共振器8および8'は、無負荷時(測定すべき物質が存在しない場合)において異なる共振周波数 ω_{01} および ω_{02} を有するように、予め調整されている。この調整は、前記同調手段によって行われる。一定の動作周波数 ω は、共振周波数 ω_{01} および ω_{02} の中間に位置するように調整される。これらの関係を図7に示す。図中、太破線(太実線)は、測定すべき物質が共振器の前に存在しない場合の第1(第2)共振器の共振曲線をそれぞれ示す。動作周波数は共振周波数 ω_{01} および ω_{02} の丁度中間に位置している。

【0124】図6において測定すべき物質が共振器近傍に置かれたとき、細線および細破線によって示される状況が起こる。図中説明を簡単にするため、誘電率の実数部のみに変化が起こる場合、すなわち $\Delta\epsilon'' = 0$ を想定している。この場合、共振器群近傍に置かれた物質の影響により、各共振曲線は、動作周波数 ω に関する対称位

置から変位する。その結果、各共振器は、固定動作周波数 ω に関する対称動作位置、すなわち各共振周波数から同距離の点では動作しなくなり、動作点は、一方の共振曲線においては共振周波数(ω_{02})の方に上昇し、他方の共振曲線においては共振周波数(ω_{01})から下降する。この動作は、「 ϵ' 」が変化する場合、 $\Delta|Z_{in}|$ の変化は、動作周波数の上下に位置する共振周波数について反対方向に起こる」という前記結果に一致する。動作周波数に関して本来対称に動作していたrf共振器は、異なる出力信号F1およびF2(例えば、測定値として、受信ループ5b中に誘導された共振器フィールドの振幅が測定される)を出力する。この共振器群の前に物質が存在することに起因するこの差は、図7においてF2-F1として示される。

【0125】図8を参照して、対照的に、物質の存在によって誘電率の虚数部のみに変化が起こる場合、すなわち $\Delta\epsilon' = 0$ の場合を考える。この場合、共振曲線は変位せずに、細線および細破線で示すように広がる。従って、共振器は依然として動作周波数 ω に関して対称に動作するため、両共振器の信号の差はなくなる。この動作は、「 ϵ'' 」が変化する場合、 $\Delta|Z_{in}|$ の変化は、動作周波数の上下に位置する共振周波数について同一方向に起こる」という前記結果に一致する。しかし、測定すべき物質が存在しないときのF1およびF2の和と、存在する場合のF1およびF2の和との間に差が生じる。これらの和の間の差F1₀+F2₀-(F1+F2)は、測定すべき物質が存在することに起因する ϵ'' の変化に比例する。上記の関係、すなわち

【0126】

【数38】

$$\Delta\epsilon' \propto \frac{F1-F2}{F1_0+F2_0}$$

【0127】

【数39】

$$\Delta\epsilon'' \propto \frac{F1_0+F2_0-(F1+F2)}{F1_0+F2_0}$$

【0128】は、共振周波数の近傍においてのみ成り立つ。しかし、上記関係は、共振周波数からより遠ざかった場合においても数量信号の振る舞いを正しく記述する。上記分析によって得られた ϵ' と ϵ'' との関係が成り立たなくなった場合には、実証的に得た改良校正曲線を制御分析ユニットに格納したものにアクセスすることで代用してもよい。

【0129】本発明の特に有用な実施例においては、図6に示す構成に更に1対のセンサ(ループ)を加え、その1対のセンサにも同一動作周波数 ω を供給し、この動作周波数に関して対称になるように同調させる。第1のセンサ対は図6に示すように測定すべき試料に向けて設置されるのに対し、第2のセンサ対は、基準媒体に向けて設置される。第2のセンサ対の信号は、第1のセンサ

対と同様の分析処理を受ける。測定すべき試料に向けて設置された第1のセンサ対と基準媒体に向けて設置された第2のセンサ対との比較によって、有用な基準値が得られ、その基準値を用いて装置を校正することが可能である。基準媒体としては、例えば、以下のものが用いられる：

—空の空間(空気)

—既知の特性を有する基準媒体

—物質の湿度を測定したい場合、同物質からなる乾燥試料

—誘電体層の厚さを測定したい場合、既知の厚さを有する同誘電体層

—未知の距離を測定したい場合、誘電体に対する既知の距離

【0130】

【発明の効果】本発明によれば、共振曲線のサンプリングを完全に回避でき、両共振器は同一の定周波数で動作し得ることは言うまでもない。この結果、装置が大幅に簡素化される。更に、本発明の装置の周波数の調整は非常に簡単である。すなわち、測定すべき物質の非存在下において、両rf共振器が同じ振幅を有する出力信号を出力するように、上記rf共振器の動作周波数および共振周波数は調整される。その結果、各共振器は同一共振曲線がシフトした共振曲線を有しているために、動作周波数が両共振器の共振周波数の丁度中間に位置することが保証される。

【0131】本発明によれば、両rf共振器を、各導体部分によるシールド効果が得られるように、かつ透過性を有する部分を物質の流れに向けて設置することにより、物質の測定を、連続的に、かつ余分な試料を採取する必要なしに行い得る。その結果、物質の流れは、連続的かつ時間的な遅延なしに測定され得る。

【0132】本発明の更なる効果は、誘電共振器を用いるため、空洞型共振器に比較してコンパクトかつロバストな構成が可能であることである。

【0133】本発明によれば、誘電特性から推定し得る物質の含有湿度の決定において、特別な重要性を有する。また、本発明による方法は、既知の材料からなる層の層厚の決定など、誘電物質の特性に基づく全ての測定および制御に適している。

【図面の簡単な説明】

【図1】誘電共振器を筐体内部に有する単体のrf共振器の軸上の断面を示す図。

【図2】図1のII-II断面を示す図。

【図3】共振器回路の等価回路を示す図。

【図4】共振器回路の等価回路を示す図。

【図5】共振器回路の等価回路を示す図。

【図6】試料の上方に置かれた2つの対称な共振器を示す概略図。

【図7】第1(点線)および第2(実線)の共振器の、

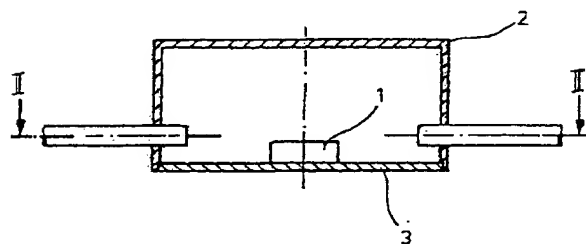
試料の非存在下（太）および試料存在時（細）の、 $\Delta \epsilon'' = 0$ における共振曲線を示す図。

【図8】第1（点線）および第2（実線）の共振器の、試料の非存在下（太）および試料存在時（細）の、 $\Delta \epsilon'' = 0$ における共振曲線を示す図。

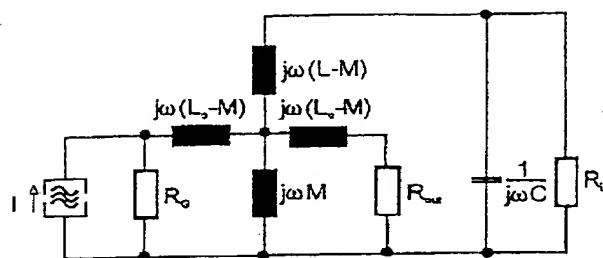
【符号の説明】

1、1' 誘電共振器

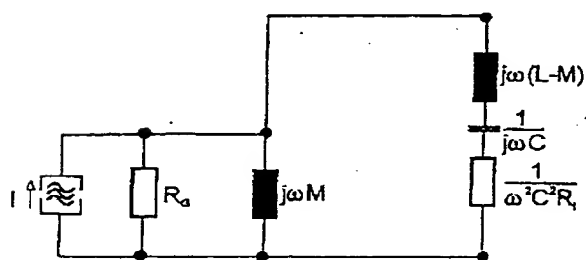
【図1】



【図3】



【図5】



2、2' 筐体の第1の部分

3、3' 筐体の第2の部分

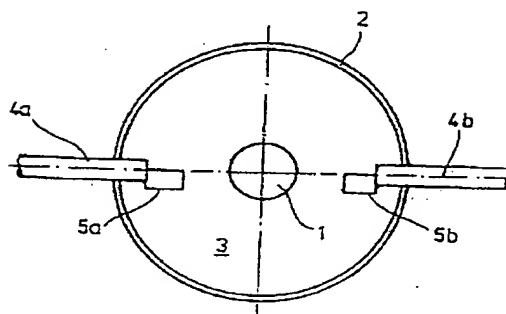
4a、4b 同軸ケーブル

5a、5b 結合ループ

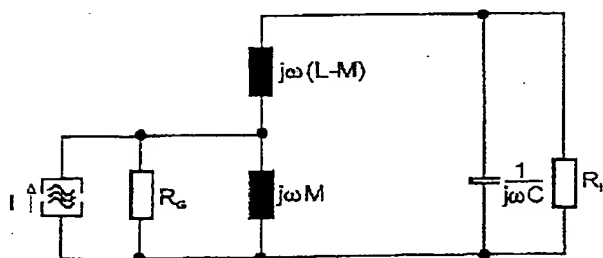
8、8' rf共振器

10 試料

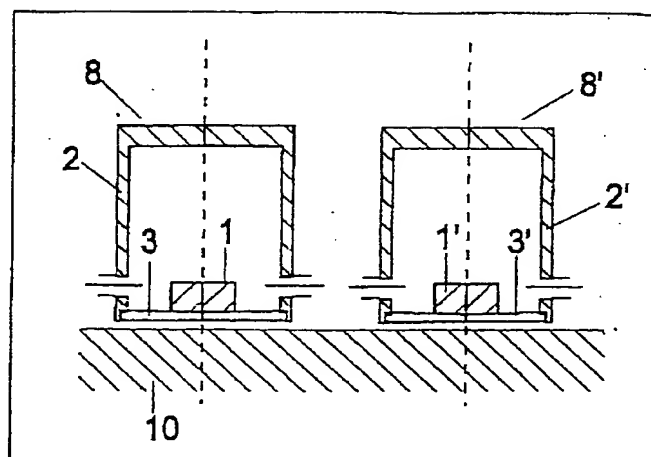
【図2】



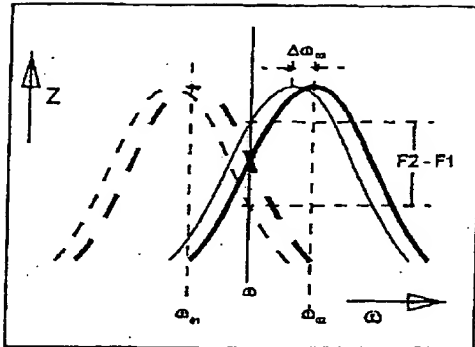
【図4】



【図6】



【図7】



【図8】

